

Учёт реальных свойств источника тепла при решении тепловой задачи нагрева шлако – металлической среды в сталеплавильном конвертере

Р.О. РЯЗАНЦЕВ

Днепродзержинский государственный технический университет

У роботі пропонується вдосконалення математичної моделі гідродинамічних і теплових процесів, що протікають у сталеплавильному конвертері, за допомогою введення джерела тепла враховуючого реальний характер протікання окисних екзотермічних реакцій на границі реакційної зони

В работе предлагается совершенствование математической модели гидродинамических и тепловых процессов, протекающих в сталеплавильном конвертере, с помощью введения источника тепла учитывающего реальный характер протекания окислительных экзотермических реакций на границе реакционной зоны

In article is offered improvement to mathematical model hydrodynamics and heat processes, running in steel-melting converter, by means of entering the source of the heat taking into account real nature passing oxidize exothermal reactions on border of the reactionary zone

Компьютерное моделирование металлургических процессов в сталеплавильных конвертерах, продолжает оставаться актуальным в связи с постоянно возрастающими требованиями по энергосбережению, экологической безопасности и качеству продукции. Так, например, в работах [1,2] приведены достаточно корректные математические модели позволяющие описать состояния и динамику тепловых процессов, как в металлической, так и в шлаковой фазах в ходе конвертерной плавки. Кроме того, такие модели позволяют анализировать соответствующие картины течений, причём в [1] отмечено, что одно из направлений совершенствования моделей может быть связано с учётом тепла фазовых переходов и более адекватному расчёту условий на границах раздела фаз (расчётных зон). Кроме того, в связи со сложностью и многоплановостью металлургических процессов в конвертере задача расщеплялась на динамическую и тепловую составляющие на основании предположения о незначительности влияния поля температур на динамические параметры течений в то время как, например, поле скоростей является одним из определяющих факторов для поля температур.

В данной статье предлагается обобщенная математическая модель, включающая аэрогидродинамический и жидкометаллический фрагменты, сопряженные с тепловой задачей которая, в свою очередь, основывается на физических представлениях об источнике тепла – границе реакционной зоны, её конфигурации, характере экзотермических реакций, режиме продувки и т. д. При этом учитывалось, что характер температурных полей в пределах фаз оказывает незначительное воздействие на поля распределения кинематических параметров, в то время как характер движения многофазной среды в сталеплавильном конвертере оказывает определяющее воздействие на конфигурацию тепловых полей в полости конвертера.

Итак, гидродинамическая часть задачи описывается уравнениями:

$$\partial \vec{V} / \partial t = R(\vec{V}, \alpha) - \vec{\nabla} \tilde{p}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \vec{V} = \hat{O}(\vec{V}, \alpha), \quad (2)$$

$$\partial \alpha / \partial t = -\vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{V}) + \hat{O}(\vec{V}, \alpha). \quad (3)$$

где: \vec{V} - барицентрическая скорость среды газ - расплав; t - время процесса; \tilde{p} - динамическая составляющая давления, деленная на ρ_0 ;

$$R(\vec{V}, \alpha) = -(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} + v_e \Delta \vec{V} + \zeta_e \vec{\nabla}(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) + (1 - \alpha)\vec{g} + \vec{f}_e, \quad (4)$$

$$\hat{O}(\vec{V}, \alpha) = \Psi - \alpha d'(\ln \rho') / dt - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{W}). \quad (5)$$

v_a и ζ_a - эффективные коэффициенты вязкости; \vec{g} - ускорение свободного падения; Ψ и \vec{W} - объемный источник и диффузионная скорость газовой фазы; ρ' - плотность газа; \vec{f}_e - удельная сила Лоренца.

На основании этой модели, например, в работе [3], рассчитывалось поле скоростей в предположении однородного и стационарного поля температур, т. е. вязкость среды была задана одинаковой по всему объёму ванны. Тем не менее была получена достаточно адекватные результаты, которые позволили выявить в жидкометаллической и газошлаковой зоне характерные области, в том числе вихри течений, их развитие во времени.

В работе [1] к гидродинамическому этапу добавлен тепловой этап, который описывается уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{\nabla}(\vec{v}T) = \frac{1}{\rho c} [\vec{\nabla}(\lambda \vec{\nabla} T) + Q]. \quad (6)$$

Второе, слагаемое левой части уравнения (6) описывает процесс конвективного переноса и содержит скорость движения расплава, которая находится на предыдущем этапе расчета. Именно таким образом в модели непосредственно связываются теплоперенос и движение среды в конвертере. Правая часть уравнения (6) описывает процесс теплопроводности в расплаве металла, с учётом наличия источников тепла. Его расчёт является довольно сложным из-за экзотермических реакций, которые происходят на поверхности раздела фаз: металл – струя кислорода; металл – газовые пузыри; металл – шлак и т.п. В уравнении (6) именно слагаемое (Q), учитывает тепло, выделяемое во время протекания химических реакций. Эта величина зависит от концентрации газовой фазы в расплаве металла, то есть от режима продувки конвертора кислородом. При моделиро-

вании второго этапа задачи учитывалось, что источник тепла действует на границе раздела газ – металл.

Граничные условия для данной математической модели были заданы следующим образом. На оси симметрии было задано условие теплоизоляции (граничное условие первого рода), а на поверхности контактирующей с окружающей средой сток тепла описывается уравнением конвективного теплообмена:

$$q_T = \alpha_T (T_S - T_{cp}). \quad (7)$$

где $T_{\text{н}0}$ - температура окружающей среды, а α_T - эмпирический коэффициент теплоотдачи.

В данной работе разностное представление уравнения (6), получено в виде:

$$\bar{\nabla}(\bar{\nabla}T) = \frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{u[i, j] * (t[i+1, j] - t[i, j]) + u[i-1, j] * (t[i, j] - t[i-1, j])}{dr} \right) + \left(\frac{v[i, j] * (t[i, j+1] - t[i, j]) + v[i, j-1] * (t[i, j] - t[i, j-1])}{dz} \right) \right) \quad (8)$$

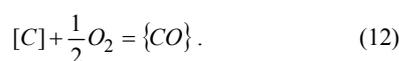
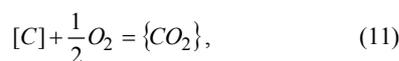
$$\begin{aligned} \bar{\nabla}(\lambda \bar{\nabla}T) &= \lambda 1 * \left(\frac{v[i, j] * dz(t[i, j+1] - t[i, j])}{dz^2} \right) \\ &- \lambda 2 * \left(\frac{v[i, j-1] * (t[i, j] - t[i, j-1])}{dz^2} \right) + \\ &+ \lambda 3 * \left(\frac{u[i, j] * dr(t[i+1, j] - t[i, j]) * (i-1)}{dr^2 * (i-1.5)} \right) - \\ &\lambda 4 * \left(\frac{u[i-1, j] * dr(t[i, j] - t[i-1, j]) * (i-2)}{dr^2 * (i-1.5)} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\lambda[i, j] = \frac{\lambda[i] * \lambda[j]}{\lambda[i] + \lambda[j]} \quad (10)$$

Формат представления теплопроводности на границе раздела зон, обусловлен сложением тепловых сопротивлений соседних ячеек по обе стороны границы раздела фаз. Теплопроводность – величина обратная сопротивлению, т. о. сложению тепловых сопротивлений соответствуют сложение обратных величин теплопроводностей, что и даёт приведенное выражении (10) для λ . Это же соотношение выполняет функцию “сшива” различных расчётных зон.

Как отмечалось адекватность моделирования источника тепла является одной из определяющих корректности тепловой модели в целом. Это моделирование проводилось для 160 тонного конвертера с верхней продувкой и основывалось на учёте тепла, выделяемого в результате экзотермических реакций на поверхности раздела фаз газ – металл.

Как следует из [4], основными химическими реакциями, в результате которых происходит нагрев расплава металла при соответствующем ведении плавки, являются:



Тепло, получаемое при окислении 1 кг углерода до CO_2 , а также при окислении 1 кг углерода до CO , соответственно равны $q_{co_2} = 32,9 \text{ кДж}$ и $q_{co} = 11,1 \text{ кДж}$ [4]. Содержание углерода в расплаве металла составляет

приблизительно 4% от общей массы, т. е. масса углерода в этом случае будет равна:

$$m_c = 0,04 * 160 = 6,4 \text{ т}. \quad (13)$$

Следует также учесть, что углерод в кислородном конвертере окисляется в среднем на 10 – 12% до CO_2 и на 88 – 90% до CO [4]. Таким образом, тепло, получаемое от этих реакций можно определить из следующих соотношений:

$$Q_{co_2} = m_c * 0,1 * q_{co_2} = 6,4 * 10^3 * 0,1 * 32,9 = 21056 \text{ МДж}, \quad (14)$$

$$Q_{co} = m_c * 0,9 * q_{co} = 6,4 * 10^3 * 0,9 * 11,1 = 63936 \text{ МДж}. \quad (15)$$

Суммарное количество тепла, выделяемое при окислении углерода будет равно:

$$Q_s = Q_{co_2} + Q_{co} = 21056 + 63936 = 84992 \text{ МДж}. \quad (16)$$

Но на долю окисления углерода приходится примерно 54 – 58% всего тепла выделяемого в конвертерной ванне [4], следовательно:

$$Q_s = 0,54 * Q_k, \quad (17)$$

$$Q_k = \frac{Q_s}{0,54} = \frac{84992}{0,54} = 157392,59 \text{ кДж}. \quad (18)$$

Таким образом, количество тепла выделяемого в единицу времени будет равно:

$$P = \frac{Q_k}{\tau_{pl}} = \frac{157392,59}{1200} = 131,16 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}, \quad (19)$$

что и определяет тепловую мощность источника для данных условий, которая использовалась на этапе теплового моделирования.

Результаты расчёта температурных полей в этом случае приведены на рис. 1-2 в виде радиальных распределений температуры для наиболее характерных зон в различные моменты времени от начала продувки.

На рис. 1-2 индексу 1 соответствует распределение температуры в приповерхностном горизонтальном сечении жидкометаллической ванны, индексу 2-в среднем сечении, индексу 3- в придонном сечении. Как видно из рисунков начало плавки характеризуется малыми перепадами температур, причём распределения 2 и 3 за пределами хорошо просматриваемой реакционной зоны вообще совпадают, что свидетельствует о неустановившемся характере течения и незначительности прогрева ванны в этот момент времени. В ходе плавки температурные градиенты возрастают, распределения 2 и 3 расслаиваются, распределение 1 практически выполаживается, а пристеночная область распределения 2 повышается. Эти изменения становятся хорошо заметными после 30 секунды плавки. В дальнейшем эти тенденции сохраняются, что видно из сравнения рис. 2 и рис. 1, и по истечении нескольких минут распределение практически стабилизируется. Такая динамика распределений и их конфигурация хорошо соответствует физическим представлениям и экспериментальным данным о ходе процесса плавки в конвертере. Так выполаживание 1 объясняется развитостью течения в приповерхностном слое и его теплоизоляцией шлаковой областью, а высокий уровень температуры - выносом тепла из реакционной зоны. Обращает внимание близость распределений 2 и 3 на границе реакционной зоны, что объясняется интенсивным перемешиванием металла в этой области. Динамика периферийных

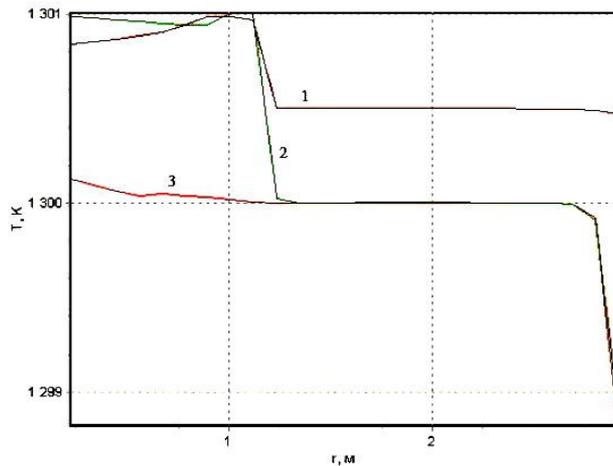


Рис. 1. Распределение значений температур в полости конвертера для 3.7 секунды процесса; 1 – приповерхностный слой, 2 – срединное сечение, 3 – придонное сечение.

областей распределений 2 и 3 объясняется наличием соответствующего вихря течения, который имеет тороидальную структуру и располагается в придонно-стеночном поясе конвертера. Следует отметить, что в результате применения данной модели получены достаточно корректные абсолютные значения температуры жидкометаллической фазы и её градиентов для различных областей конвертера. Как следует из графиков металл в ходе плавки нагревается приблизительно на 200 С, и достигает максимальной температуры 1500 С, а значение перепадов температур имеет величину 10-12 С, причём области максимальных перепадов, как и следовало ожидать, приходятся на границу реакционной зоны и донно-стеночную область. Обе области имеют осевую симметрию и представляют собой приблизительно цилиндрические слои. Через первый из них тепло из реакционной зоны отводится в остальную часть ванны, а через второй происходит сток тепла от ванны к стенкам конвертера, что и обуславливает соответствующие перепады температур.

Для того чтобы получить более полное представление о характере распространения тепла в конвертерной ванне, радиальные распределения температур дополнены графиками, на которых изображены изолинии температур, рис 3, 4. Из рисунков видно, что тепло распространяется, от фурмы к стенке конвертера, при этом в околофурменной зоне изолиния температур резко идет вверх (область восходящих потоков), и после достижения своего пика опускается вниз (область контакта газовой и металлической фаз). Очевидное соответствие между изолиниями температуры на рис. 3, 4 и данными расчёта поля скоростей приведенными в работе [5] заставляет сделать вывод о том, что изолинии температуры в такой многофазной перемешивающейся среде формируется главным образом линиями тока, который и обеспечивает перенос конкретной фазы с данной температурой. Так, например, передний фронт области 1 на рис. 3, 4, который по существу является образующей объёмной

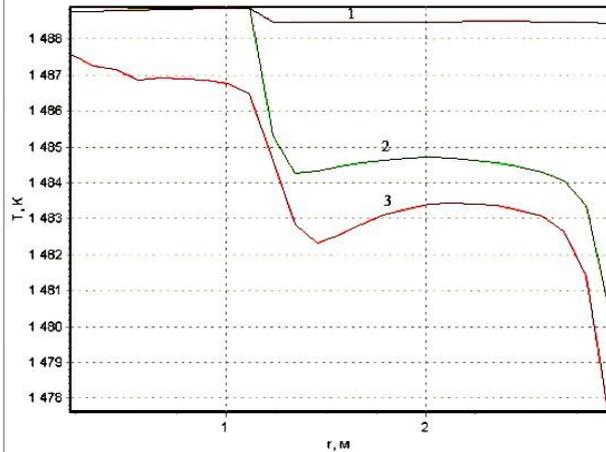


Рис. 2. Распределение значений температур в полости конвертера для 1120.0 секунды процесса; 1 – приповерхностный слой, 2 – срединное сечение, 3 – придонное сечение.

области реакционной зоны, однозначно соответствует границе раздела реакционная зона – металл, причём области газовой среды соответствует восходящий поток [6], а области жидкой – периферия зарождающегося тороидального вихря металлической фазы, а также тороидального вихря шлаковой фазы порождаемого прострельной зоной, между которыми формируется промежуточный вихрь. Этот вихрь физически необходим, т. к. в противном случае возникает разрыв между линейными скоростями движения пограничных слоев металлической, шлаковой и газовой фазы реакционной зоны. Это легко объясняет резкий уход в придонную область изолинии температуры 1 на рис. 3, круговой характер изолинии 2 на этом же рисунке. Как видно, по ходу плавки, область высоких температур расширяется в радиальном направлении от оси конвертера, что отражено положением изолинии 1 на рис. 3 б. При этом замкнутый (вихревой) характер изолинии 2 сохраняется, что характерно и для изолинии 2 на рис. 4 а и 4 б и соответствует сохранению вихревого характера поля скоростей в этой области конвертера (придонный тороидальный вихрь).

Как видно, рассмотренная модель оказалась вполне корректной в том смысле, что позволила описать совместно тепловое, химическое и кинематическое состояния многофазной среды в конвертере и их динамику. Следует отметить что тепло, выделяемое в реакционной зоне определялось с учётом экзотермических реакций протекающих на поверхности раздела газ – металл. Таким образом, можно говорить о адекватности рассмотренной модели, которая подтверждается и экспериментальными данными. Важно подчеркнуть хорошее соответствие между тепловой и кинематической моделями, что отражено полным совпадением профиля изотерм и характера поля скоростей в работе [6], что в свою очередь соответствует физическим представлениям о процессах переноса тепла и кинематике движения фаз в конвертере.

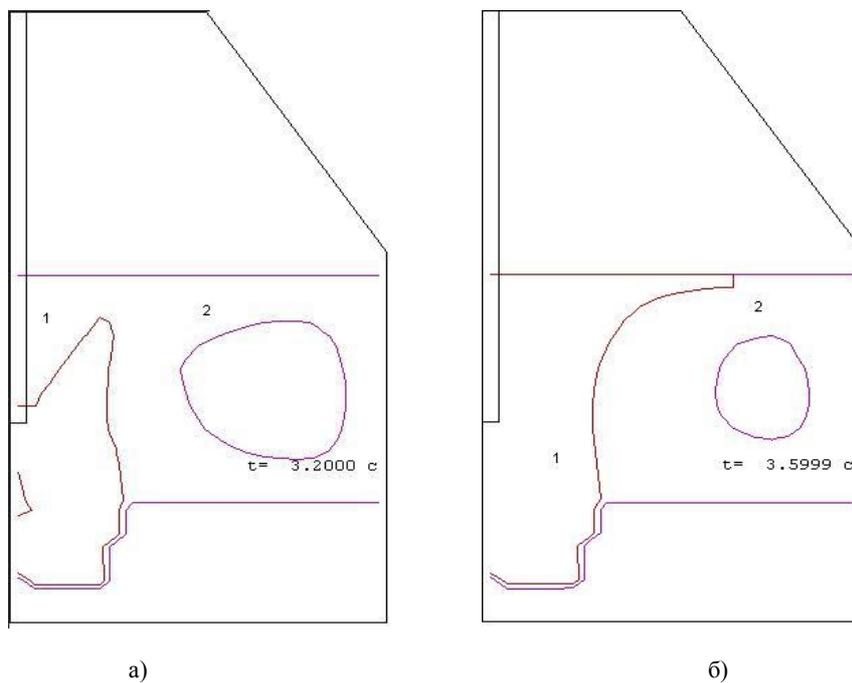


Рис. 3. Изолинии температуры расплава металла в конвертере в различные моменты продувки; 1 – 1310, 2 – 1305.

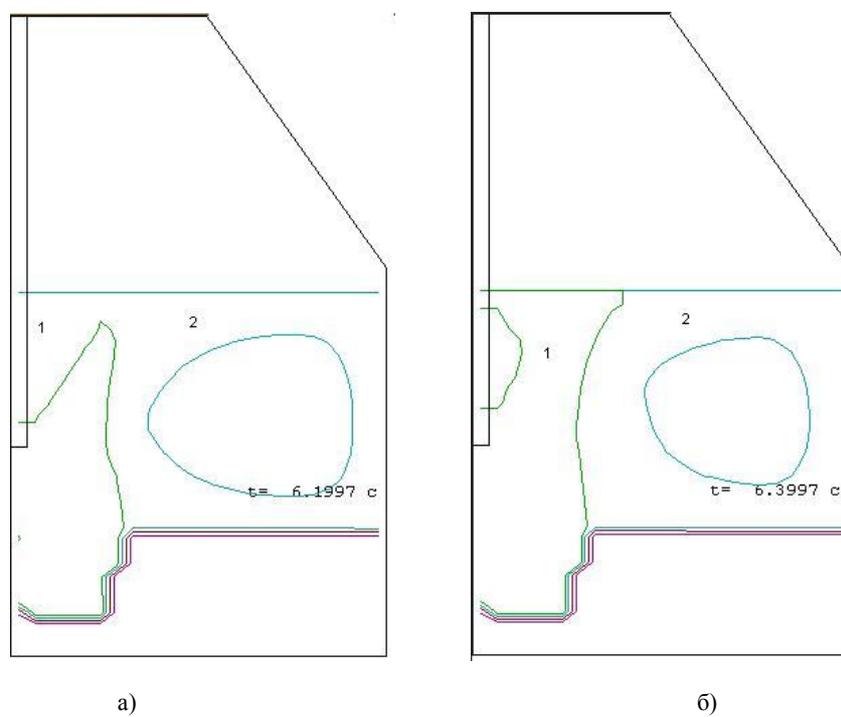


Рис. 4. Изолинии температуры расплава металла в конвертере в различные моменты продувки; 1 – 1320, 2 – 1315.